毛乌素沙地人工固沙植被的土壤养分效应

陈 闻[1]， 杨晶晶[1]， 袁媛[1]， 张 鹤[1]， 韩凤朋[1,2]

（1. 西北农林科技大学资源环境学院，陕西 杨凌 712100；2. 中国科学院水利部水土保持研究所，水利部水土保持生态工程技术研究中心，陕西 杨凌 712100）

摘 要： 为探索毛乌素沙地不同人工固沙植被对土壤养分的影响规律，选取毛乌素沙地6种典型人工固沙植被为研究对象，通过分析计算0~100 cm土壤的理化性质和6种不同人工固沙植被林的土壤养分指数(SNI)，研究结果表明：6种人工固沙植被的土壤容重无显著差异，呈现弱变异。土壤有机碳(SOC)、全氮含量(TN)均表现出表层大于底层，全钾(TK)含量无显著差异，磷(P)含量无明显规律性。土壤有机碳密度0~20 cm显著高于其他土层，表现出明显的表聚现象。0~100 cm的土壤有机碳(SOC)累积储量除裸沙地之外随土壤深度变化，6种人工固沙植被样地可以通过对数函数[$y=a\ln(x)+b$，R^2>0.96]模拟。土壤养分指数(SNI)从大到小为花棒(*Hedysarum scoparium*)>樟子松(*Pinus sylvestris*)>苜蓿(*Medicago sativa*)>紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)>长柄扁桃(*Amygdalus pedunculata*)>沙蒿(*Artemisia desertorum*)，结果表明，花棒林(*Hedysarum scoparium*)的土壤养分状况最好，6种植被类型中花棒(*Hedysarum scoparium*)是毛乌素沙地中最适宜种植的植被。

关键词： 毛乌素沙地；人工固沙；土壤容重；土壤养分；养分指数

毛乌素沙地位于中国半干旱地区(37°30′~39°20′N，107°20′~111°30′E)，总面积3.98×10⁴ km²，植被覆盖率低，生态脆弱，风力侵蚀严重，土地沙化问题突出[1]，严重阻碍了当地社会和经济的可持续发展[2]。人工植被建设是改善和控制荒漠化最常见和最有效的方法之一[3-4]。自20世纪80年代，当地政府实施退耕还林还草措施以来，通过栽植了适应沙地生存的植被，已经显著改善了毛乌素沙地的生态环境[5-6]。

樟子松(*Pinus sylvestris*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、苜蓿(*Medicago sativa*)、长柄扁桃(*Amygdalus pedunculata*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)和沙蒿(*Artemisia desertorum*)被广泛用于毛乌素沙地的植被重建，以稳定流沙进行生态修复，成为毛乌素沙地典型的人工植被。已有研究表明在流动沙地上种植植物有助于提高土壤固碳能力[7]，而应减少纯种林的种植面积，营造多样性丰富的固氮混交林[8]。有学者对毛乌素沙地南缘生态过渡带上的土壤微生物特征[9]、土壤酶活性[10]以及土壤理化性质[11]进行了研究，发现从缓坡丘陵梁地到流动半流动沙丘，土壤微生物特征、酶活性和土壤养分含量逐渐降低。国内外学者对于土壤养分的空间异质性开展了大量研究[12-14]。目前对毛乌素沙地人工植被区土壤养分评估研究较少。本研究以毛乌素沙地6种典型人工固沙植被为研究对象，采集和测定分析土壤养分情况，构建了土壤养分指数进行了土壤效应评价。研究结果可为毛乌素沙地的植被恢复重建提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究样地

本研究在陕西省神木市生态协会毛乌素治沙造林基地(109°52′9″E，38°53′40″N)开展，研究区域地处毛乌素沙地南缘，属于毛乌素沙地与黄土丘陵区过渡地带。海拔约为1258 m，年平均气温为6~8.5 ℃，最低温和最高温分别在1月和7月[15]，年均降

收稿日期： 2020-01-03； **修订日期：** 2020-10-25
项目资助： 国家自然科学基金项目(41471437)；国家重点研发计划(2016YFA0600801)；科技基础性工作专项项目(2014FY210100)；中国科学院科技服务网络计划(KFJ-STS-ZDTP-012)；中国科学院"西部青年学者"项目(XAB2016A04)
作者简介： 陈闻(1994-)，女，硕士研究生，研究方向为土壤环境化学. E-mail: Cw151563@163.com
通信作者： 韩凤朋. E-mail: hanxiangzi007@163.com

水量在250~440 mm左右，主要集中在7—9月，占全年降水量的60~75%[16]；最大日降水量为141.7 mm，年蒸发量约为年降水量的5倍。土壤类型主要为风沙土，研究区植被主要为人工固沙林，花棒（*Hedysarum scoparium*）、长柄扁桃（*Amygdalus pedunculata*）、紫穗槐（*Amorpha fruticosa*）、苜蓿（*Medicago sativa*）、沙蒿（*Artemisia desertorum*）、樟子松（*Pinus sylvestris*）为主要造林植物种。

1.2 实验方案和采样

研究采样于2019年4月在陕西省神木市生态协会毛乌素治沙造林基地（109°52′9″E，38°53′40″N）进行，选择自然状态下典型的樟子松、长柄扁桃、花棒、沙蒿、紫穗槐以及苜蓿样地为研究对象，并且以裸沙地为对照处理进行采样，每个样地都选择具有相似地形特征的地块进行采样。在移除腐殖层后，用直径5 cm的土钻收集土壤剖面样品。采样点概况见表1，从每个样地中选取10 m×10 m样方利用五点采样法，采样深度为100 cm每20 cm为一个土壤样品，每个样地3次重复，共采集土壤样品105个，去除可见的植物根、结石、枯枝落叶和碎屑，带回实验室自然风干，分别过0.25 mm和1 mm筛备用。

土壤容重利用环刀法测定[17]。每个处理挖取100 cm深土壤剖面，分别在0～20 cm、20～40 cm、40～60 cm、60～80 cm、80～100 cm取环刀样品，每个深度重复三次，共收集环刀样品105个。

1.3 实验室分析

使用Walkley-Black方法[18]测定土壤有机碳（SOC）含量，并使用凯氏定氮法[19]测定总氮（TN）含量。通过钼锑钪比色法测定总磷（TP）和有效磷（AP）含量[20]。铵态氮（NH_4^+-N）和硝态氮（NO_3^--N）用2M KCl提取新鲜土壤18 h后测定，并在Alpkem autoanalyzer（OI Analytical）上进行比色分析[21]。

1.4 计算SOC密度和土壤养分指数（SNI）

1.4.1 SOC密度

$$SOC_s = SOC \times BD \times T \times (1 - C) \times 0.01 \qquad (1)$$

式中：SOC_s表示土壤有机碳密度（kg·m^{-2}），SOC表示土壤有机碳含量（g·kg^{-1}）；*BD*表示土壤容重（g·cm^{-3}）；*T*表示土壤厚度（cm）；*C*表示粒径>2 mm百分比（%）。

1.4.2 土壤养分指数（SNI） 采用连续性质的隶属度函数计算各养分因子的隶属度值，各养分因子数据处理均采用升型分布函数：

$$N(X_i) = (X_i - X_{imin})/(X_{imax} - X_{imin}) \qquad (2)$$

式中：$N(X_i)$表示各养分因子的隶属度值；X_i表示各养分因子对应土层的平均值；X_{imin}和X_{imax}分别表示各土层第*i*项养分因子的最小值和最大值。

$$SNI = \sum_{i=1}^{n} W_i \times N(X_i) \qquad (3)$$

式中：*n*表示土壤养分指标数；W_i表示各养分因子的权重向量；$N(X_i)$表示各养分因子的隶属度值。

1.5 数据分析

通过SPSS 22.0（IBM, Amund, NY, USA）中单因素方差分析（one-way ANOVA）以及最小显著性检验法（LSD），对6种人工固沙植被林、裸沙地和5个土壤深度的各个土壤养分进行了比较。通过主成分分析法分析6种不同人工固沙植被的土壤养分指数。

2 结果分析

2.1 土壤容重的变化

土壤容重对于评估土壤养分具有重要的作用[22]，不同人工固沙植被下土壤容重随着土壤深度的变

表1 试验样地基本概况

Tab.1 Basic properties of test plots

人工固沙植被	经度	纬度	坡度(°)	海拔/m	种植年限/a
对照(CK)	109°46′21″E	38°55′3N	11	1280	0
樟子松(ZZS)	109°52′9″E	38°53′40″N	15	1258	14
紫穗槐(ZSH)	109°52′18″E	38°53′32″N	25	1249	14
苜蓿(MX)	109°52′23″E	38°52′40″N	8	1257	5
花棒(HB)	109°52′30″E	38°52′38″N	22	1268	14
沙蒿(SH)	109°52′8″E	38°54′2″N	8	1244	15
长柄扁桃(CBBT)	109°51′59″E	38°53′9″N	18	1263	14

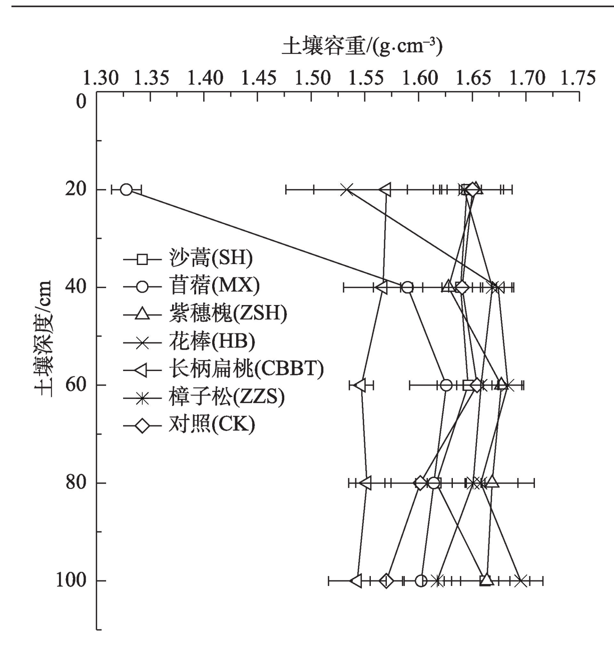


图1　不同人工固沙植被下土壤容重的变化

Fig. 1　Changes in soil bulk density for different artificial sand-fixing vegetation

化,沙地土壤容重均较低(图1)。不同人工固沙植被均降低了土壤容重,改善了沙地土壤结构。苜蓿和花棒样地中表层土壤容重最小,20~40 cm土层中有显著增加,之后随着土壤深度的增加苜蓿样地的土壤容重基本保持在1.60 g·cm^{-3}左右,而花棒基本保持在1.68 g·cm^{-3}左右。6种人工固沙植被的变异性都呈现一种弱变异,但其中苜蓿样地中的变异系数最大为7%,其次是花棒(表2)。

长柄扁桃、樟子松、紫穗槐和沙蒿样地随着土壤深度的增加土壤容重无显著变化(图1)。在表层土壤(0~20 cm)中,苜蓿样地的土壤容重最小,其次是花棒和长柄扁桃,与对照相比分别降低了24%、7.8%和5.1%。另外苜蓿和花棒样地中在40 cm土层处显著增大,之后随着土层深度的增加无显著变化,分别在1.61 g·cm^{-3}和1.65 g·cm^{-3}左右变化。在整个土壤采样剖面上,与对照相比长柄扁桃的土壤容重最低,但随着土壤深度的增加无显著差异,基本保持在1.55 g·cm^{-3}左右,其他5种人工固沙植被无显著变化,随着土壤深度的增加土壤容重呈现波动变化,但未达到显著水平。

2.2　土壤养分变化

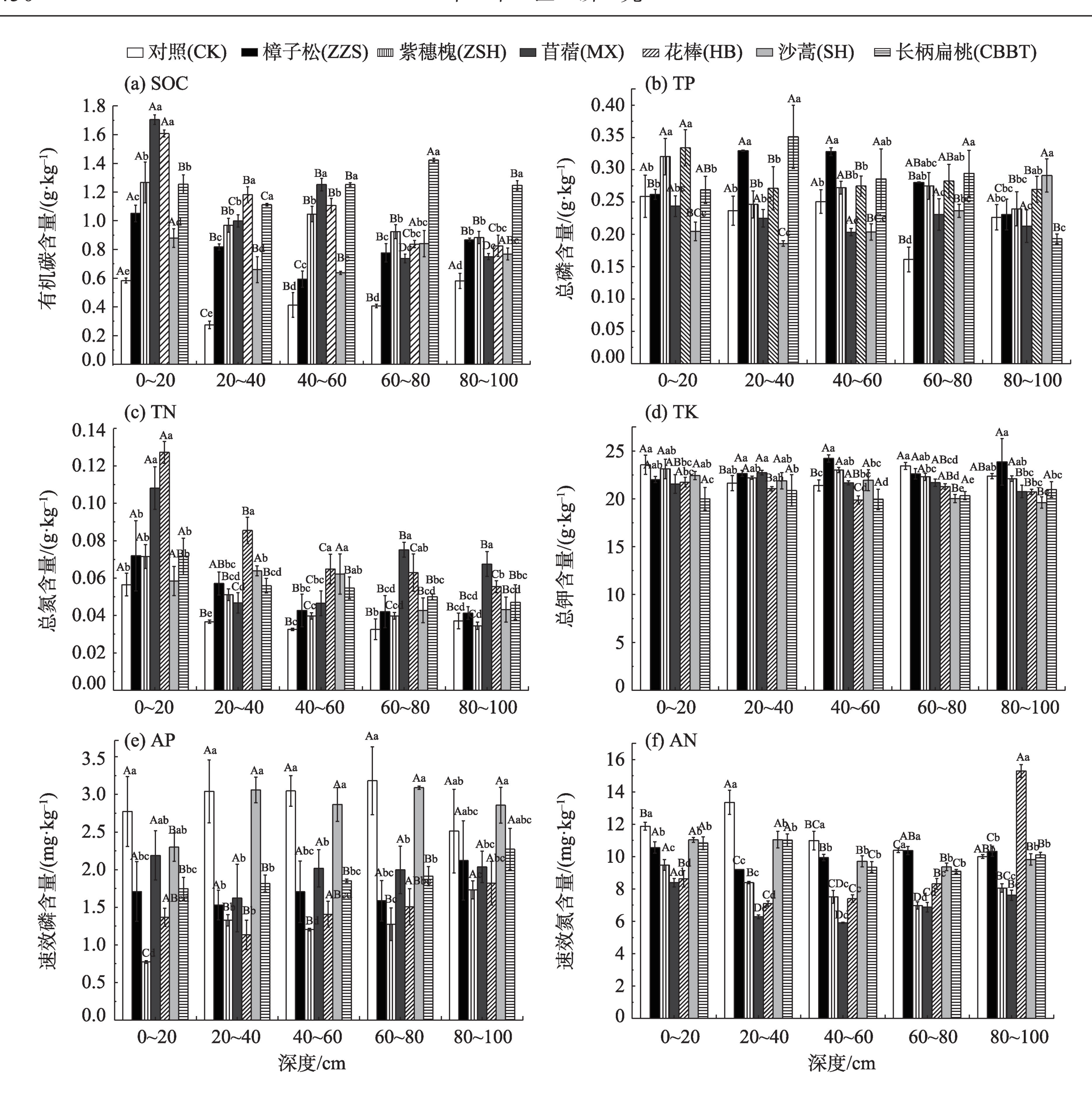
分析毛乌素沙地不同人工固沙植被样地中土壤养分的变化,并参照全国第2次土壤普查土壤养分分级标准[23]可知,毛乌素沙地土壤养分处于较低水平。6种不同人工固沙植被样地中土壤养分各个指标含量均较低,但是整体呈现表层土壤(0 ~ 20 cm)显著高于底层土壤(P<0.05)(图2)。不同人工固沙植被下SOC、TN和TP含量均显著高于裸沙地,而AN和AP含量均显著低于裸沙地(P<0.05),TK含量无显著变化。6种不同人工固沙植被样地SOC、TN和TP含量都随着土壤深度的增加而降低。同一土层不同人工固沙植被样地之间SOC、TN和TP含量存在显著差异(P<0.05),并且这种差异主要表现在表层。0 ~ 20 cm土层中花棒林土壤养分最高,SOC、TN和TP含量与对照裸沙地相比分别增加了177.6%、125.1%和26.9%。就SOC、TN、TP和TK含量而言,在整个土壤采样剖面上花棒林最高,其次是紫穗槐和苜蓿样地,与对照相比,6种人工固沙植被都显著增加了SOC和TN含量。

不同人工固沙植被下随着土壤深度的增加,AN、AP含量都呈现波动变化,且AN和AP变化趋势相反。在整个采样剖面上对照裸沙地中的AP含量均高于6种植被恢复类型。分析毛乌素沙地不同人工固沙植被样地土壤中磷素的变化可知,毛乌素沙地磷含量严重贫乏,TP含量在0.16 ~ 0.35 g·kg^{-1}之

表2　不同人工固沙植被下土壤容重的统计特征

Tab.2　Statistical characteristics of soil bulk density under different artificial sand-fixing vegetation

人工固沙植被	最大值/(g·cm^{-3})	最小值/(g·cm^{-3})	平均值/(g·cm^{-3})	变异系数Cv	标准偏差
沙蒿(SH)	1.69	1.57	1.64	2	0.03
苜蓿(MX)	1.66	1.31	1.55	7	0.12
紫穗槐(ZSH)	1.70	1.59	1.66	2	0.04
花棒(HB)	1.72	1.46	1.65	4	0.07
长柄扁桃(CBBT)	1.65	1.49	1.56	3	0.04
樟子松(ZZS)	1.68	1.60	1.65	1	0.02
对照(CK)	1.69	1.55	1.62	3	0.05



注：大写字母表示同一人工固沙植被不同深度之间的显著性差异(P<0.05)；小写字母表示同一深度不同人工固沙植被之间的显著性差异(P<0.05)。同下。

图2　不同人工固沙植被土壤养分的变化

Fig. 2　Changes of soil nutrients in different artificial sand-fixing vegetation.

间，AP含量在1.1～3.2 mg·kg^{-1}，随着土壤深度的增加呈减少的趋势，但是在樟子松、沙蒿和长柄扁桃样地中随着土壤深度的增加TP含量呈现先增加后降低的趋势。樟子松林地中TP含量在20～60 cm土层中显著高于表层，而长柄扁桃林TP含量在20～40 cm土层中显著高于表层(P<0.05)。沙蒿、长柄扁桃样地中AN和AP含量较高，但是在花棒林80～100 cm土层中AN含量显著增加(P<0.05)。各个土壤养分指标在20～80 cm土层中都有增加趋势，但是未达到显著水平。不同人工固沙植被样地的土壤养分存在显著差异(P<0.05)，这主要是受到成土过程中的环境和植被类型的影响[24-25]。

2.3　土壤有机碳密度变化

花棒、樟子松、苜蓿、紫穗槐和沙蒿样地中表层土壤(0～20 cm)的SOC密度均显著高于底层土壤(80～100 cm)(P<0.05)。表层土壤中花棒样地SOC密度最大，其次是苜蓿、紫穗槐和长柄扁桃，与对照裸沙地相比，分别增加了157.9%、136.8%、121%和105.3%。而其他2种人工固沙植被在整个土壤剖面上无显著变化，但在整个土壤剖面上各个人工固沙植被的SOC密度都呈现随深度增加而降低的趋势(表3)。

0～40 cm土层中，花棒和苜蓿样地中SOC密度

表3　不同人工固沙植被下SOC密度

Tab.3　SOC density under different artificial sand-fixing vegetation　　/(kg· m^{-2})

土壤深度/cm	对照(CK)	樟子松(ZZS)	紫穗槐(ZSH)	苜蓿(MX)	花棒(HB)	沙蒿(SH)	长柄扁桃(CBBT)
0~20	0.19±Af	0.35±0.02Ad	0.42±0.04Abc	0.45±0.01Aab	0.49±0.02Aa	0.29±0.03Ae	0.39±0.03Bcd
20~40	0.09±0.01Ce	0.27±0.02Bc	0.32±0.02BCb	0.32±0.01Cb	0.40±0.02Ba	0.22±0.03Bd	0.35±0.01Cb
40~60	0.14±0.03Bd	0.20±0.02Cc	0.35±0.02Bb	0.41±0.01Ba	0.37±0.01Bb	0.21±0.01Bc	0.39±Bab
60~80	0.13±Be	0.26±0.02Bcd	0.31±0.01BCb	0.24±0.01Dd	0.28±0.01Cbc	0.27±0.03Ac	0.44±Aa
80~100	0.18±0.02Ae	0.28±0.01Bbc	0.29±0.02Cb	0.24±0.01Dd	0.28±0.03Cbc	0.26±0.01ABcd	0.38±0.01Ba
0~100	0.15	0.27	0.34	0.33	0.36	0.25	0.39

显著高于对照裸沙地(P<0.05),40~100 cm土层中,与对照相比,各人工固沙植被样地的SOC密度均有显著增加,并且在整个土壤剖面上各个人工固沙植被之间存在显著差异。

2.4　土壤有机碳单位面积累积储量变化

土壤固碳潜力可以通过估算有机碳储量来评估[26]。本研究中选择1 m土壤深度进行估算,便于与国际同类研究相比较[27-28]。在0~100 cm土壤剖面上长柄扁桃和花棒样地SOC储量最高,与对照裸沙地相比分别增加了168.5%和149.3%。沙蒿样地SOC储量最低,与对照裸沙地相比,沙蒿样地SOC储量增加了69.9%。

不同人工固沙植被样地的SOC储量随着深度的增加而变化。不同人工固沙植被下单位面积SOC累积储量如图3所示。关于SOC累积储量随土壤深度增加的变化除对照裸沙地以外,其他6种植被都可以通过对数函数[$y=a\ln(x)+b$]模拟,其中确定系数R^2高于0.96(图3),而对照裸沙地可以用线性函数($y=ax+b$)模拟,确定系数R^2高于0.99。

2.5　土壤养分指数变化

为了综合评价毛乌素沙地不同人工固沙植被下土壤养分质量,利用主成分分析法计算了6种不同人工固沙植被下的土壤养分指数。通过分析毛乌素沙地不同人工固沙植被下土壤养分指数可知,选取的6种人工固沙植被均提高了土壤养分指数,其中花棒样地的土壤养分指数最高为0.65,其次是樟子松样地。而沙蒿样地的土壤养分处于低水平,为0.35,其他不同人工固沙植被均能提高土壤养分水平(表4)。6种人工固沙植被的土壤养分指数依次为:花棒>樟子松>紫穗槐>苜蓿>长柄扁

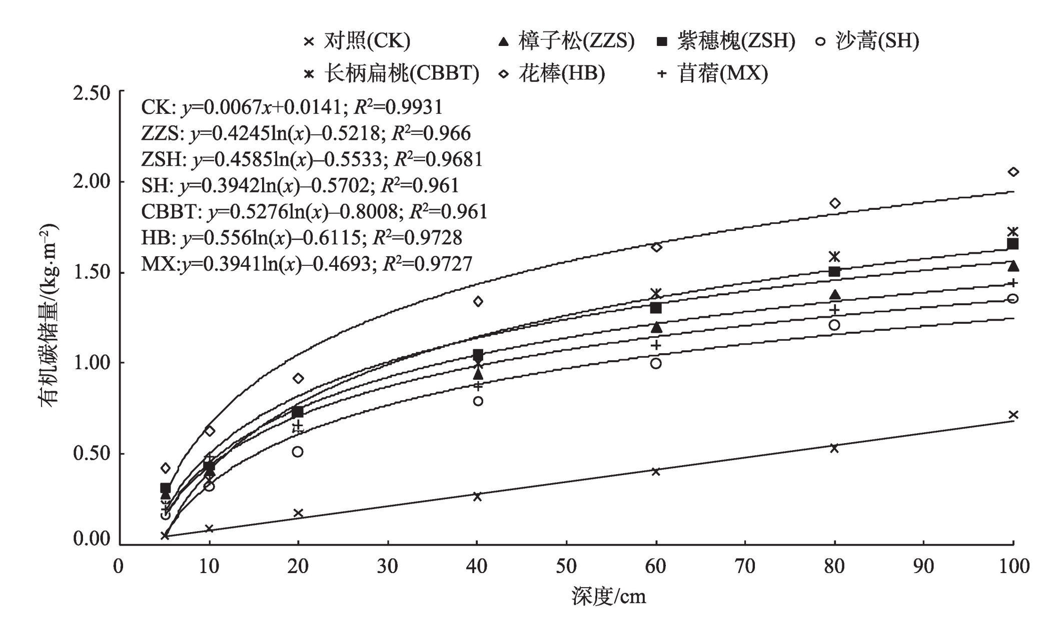


图3　不同人工固沙植被的SOC累积储量

Fig. 3　Cumulative SOC reserves per unit area of different artificial sand-fixing vegetation

表4 不同人工固沙植被的隶属度值和SNI值

Tab.4 Membership values and SNI values for different artificial sand-fixing vegetation

人工植被	隶属度						土壤养分指数(SNI)
	土壤有机碳	全氮	全磷	全钾	速效氮	速效磷	
对照(CK)	0.01	0.01	0.06	0.78	1.00	1.00	0.34
樟子松(ZZS)	0.46	0.30	0.99	1.00	0.71	0.28	0.64
紫穗槐(ZSH)	0.70	0.21	0.75	0.80	0.25	0.01	0.55
苜蓿(MX)	0.79	0.74	0.01	0.47	0.01	0.43	0.54
花棒(HB)	0.82	1.00	1.00	0.19	0.54	0.11	0.65
沙蒿(SH)	0.38	0.37	0.02	0.29	0.74	0.95	0.35
长柄扁桃(CBBT)	1.00	0.42	0.88	0.01	0.71	0.40	0.48

桃>沙蒿。

3 讨论

3.1 人工固沙植被对土壤影响的主要因素(根系、凋落物)及作用

土壤容重作为土壤的基本物理特性,受成土母质、气候以及生物扰动等因素的综合作用,对土壤养分有显著影响[29-30]。表层土壤(0~20 cm)中土壤容重较低可能是因为表层土壤中植物根系较多,其中苜蓿和花棒样地中土壤表层的根系较发达,与对照和其他人工固沙植被相比,土壤容重较低。有研究表明,花棒属落叶灌木,土地利用类型可以影响土壤容重,尤其是灌木可以显著降低土壤容重[31-33],因此花棒能有效改善沙地的土壤质地。

6种不同人工固沙植被中长柄扁桃样地的土壤容重最低,主要是因为长柄扁桃根系发达,枝条稠密,大量经微生物分解、合成的腐殖质以及枯枝落叶在土壤中累积,使土壤疏松多孔,因而降低了土壤容重,改善了沙地土壤结构。在整个土壤剖面上花棒和紫穗槐样地的土壤容重较大,对沙地土壤的改良效果较低,这与关其格等人[34]的研究不一致,因为本研究中长柄扁桃能有效改善土壤结构,相比花棒和紫穗槐,长柄扁桃对沙地土壤的改良效果更好。不同人工固沙植被样地中随着土壤深度的变化其土壤容重有不同程度的变化,因为不同人工固沙植被中植被根系的分布存在较大差异[35]。

土壤养分是植被生长的基础,土壤养分水平直接影响植被的生长发育,植树造林是保持水土、改善生态环境的重要措施,是生态交错区进行生态修复的重要举措。本研究中不同人工固沙植被均对土壤养分有显著影响,因为建立植被后,枯落物以及根系的作用导致土壤肥力水平发生显著变化。在自然生态系统中,土壤表层植被凋落物和根系的分解转化被认为是土壤有机碳输入的主要途径[36]。不同人工固沙植被样地中SOC和TN含量都随着土壤深度的增加而降低,表明土壤表层枯枝落叶的积累与分解以及植被根系的代谢对SOC产生积极影响,导致不同人工固沙植被样地中SOC有明显的表聚现象,这与前人的研究结果一致[37-38]。SOC是影响TN水平的重要因素[39-41],TN含量主要取决于SOC的积累以及分解作用的相对强度,因此本研究中6种人工固沙植被样地TN含量的变化规律与SOC含量的变化规律基本一致,但是与SOC含量的表聚现象相比,TN含量的表聚现象不明显。

苜蓿样地AN含量最低,这是由于本研究中选取的苜蓿样地种植年限为5 a,属生长初期,而苜蓿在生长初期固氮能力低,其生长发育过程消耗大量的土壤养分。不同人工固沙植被下AP含量都显著降低,因为是植物生长所必需的磷素几乎全部来源于土壤,这与杨越等人[42]的研究结果一致。土壤中的磷含量主要受土壤类型、土地利用方式、土壤理化性质以及气候条件的影响,成土母质的磷含量影响土壤对磷的吸附能力以及成土母质中TP的含量,同时也是形成磷垂直分布特征的直接原因[43]。由于毛乌素沙地土壤都以风沙土为主,而风沙土发育程度较低,对磷的吸附能力较低,所以造成各个人工固沙植被样地中TP和AP含量在土壤采样剖面上的特征不明显,缺乏规律性。

综上所述,种植植被可以增加生态系统碳库[44],因为建立植被后大量木屑和枯枝落叶不断积累,并随着植被恢复年限的增加不断被分解,其次植物覆

盖度增加使沙地中土壤风蚀减少,因此不同人工固沙植被样地中SOC含量显著高于裸沙地。6种人工固沙植被样地的土壤养分在表层土壤中的差异最显著,因为在植被恢复初期,大量的枯枝落叶以及根系分泌物主要在土壤表层积累[43],因此表现为土壤表层养分含量存在显著差异。在同一气候和土壤条件下,SOC的输入量在很大程度上受植被类型和人为扰动等因素的影响,不同植被类型对SOC储量产生不同的影响,相比于其他人工固沙植被,沙蒿样地中的SOC储量最低,而花棒样地中最高,因为在6种植被恢复类型中沙蒿样地植被覆盖度低,导致土壤风蚀严重,大量的SOC损失,而花棒样地中植被覆盖度较大,枝条茂密,主侧根发达,有利于土壤养分的保持,导致大量的碳积累,从而使SOC密度以及储量都表现为最高,这与许多研究者的研究结果一致[45-46]。与其他人工固沙植被相比,花棒和长柄扁桃样地的土壤养分最高,因为长柄扁桃和花棒自身根系发达,枝条繁密,大量枯枝落叶以及根系分泌物在土壤中积累,并随着植被生长年限的增加由于微生物的作用而不断被分解和矿化,导致大量养分在土壤中积累并提高了土壤肥力水平[47,35]。

3.2 不同人工固沙植被土壤效应的差异性

许多学者研究生态系统的结果表明,SOC通常随着土壤采样深度的增加而降低。在退化土地的恢复过程中,上层和下层土壤层之间存在很大差异[48-49],因此,在评估不同人工固沙植被样地之间SOC储量是否有显著响应时,必须考虑土壤采样深度,在大多数研究结果中,SOC的垂直变化对土壤层的不同组合有不同的响应[50-51]。本研究中选取100 cm土层对SOC累积储量进行模拟,6种人工固沙植被可以通过对数函数进行模拟,而对照裸沙地SOC储量可以通过线性函数模拟,这是因为在对照裸沙地中无植被覆盖,随着土层深度的变化SOC无显著变化,而在6种人工固沙植被样地中随着土层深度的增加,植被根系、凋落物等逐渐减少,SOC含量逐渐降低。

由于土壤肥力水平形成机制具有复杂性,不同学者对土壤肥力的理解不同,因此土壤肥力的评价方法和指标也各不相同[21,52],然而对土壤养分水平进行综合评价已经成为区域生态建设与土壤环境修复的一项重要工作内容。本研究选取毛乌素沙地6种人工固沙植被为研究对象,采用主成分分析法进行分析,花棒样地的土壤养分指数最高,在本研究中选取的6种人工固沙植被样地中,花棒样地的SOC、TN、P含量等均有显著提升,这说明在毛乌素沙地种植花棒能有效改善沙地土壤侵蚀,从而达到保持土壤养分效果,提高土壤肥力。

4 结 论

毛乌素沙地的土壤容重在不同人工固沙植被样地间无显著差异。土壤养分随着植被恢复类型而变化,花棒林土壤SOC、TN、TP、TK以及AP和AN均表现为最高,其次是樟子松、紫穗槐、苜蓿和长柄扁桃。不同人工固沙植被样地的单位面积累积SOC储量随深度增加的变化除对照裸沙地以外,其他6种人工固沙植被可以通过对数函数[$y=a\ln(x)+b$]模拟,其中确定系数R^2高于0.96。分析不同人工固沙植被样地中土壤养分指数的变化,6种不同人工固沙植被依次为花棒>樟子松>紫穗槐>苜蓿>长柄扁桃>沙蒿。综上所述,在本研究中毛乌素沙地中最适宜种植的植被为花棒,其次是樟子松、紫穗槐、苜蓿、长柄扁桃和沙蒿。

参考文献(References):

[1] Cao C, Jiang S, Ying Z, et al. Spatial variability of soil nutrients and microbiological properties after the establishment of leguminous shrub *Caragana microphylla* Lam. plantation on sand dune in the Horqin Sandy Land of Northeast China[J]. Ecological Engineering, 2011, 37(10): 1467–1475.

[2] Wen S, Qiang L Y, Kun W S, et al. Dynamic changes of surface soil organic carbon and light-fraction organic carbon after mobile dune afforestation with Mongolian pine in Horqin Sandy Land[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(8): 2069–2074.

[3] Su Y Z, Zhang T H, Li Y L, et al. Changes in soil properties after establishment of *Artemisia Halodendron* and *Caragana microphyllaon* shifting sand dunes in semiarid Horqin sandy land, Northern China[J]. Environmental Management, 2005, 36(2): 272–281.

[4] Su Y Z, Zhao W Z, Su P X, et al. Ecological effects of desertification control and desertified land reclamation in an oasis-desert ecotone in an arid region: a case study in Hexi corridor, Northwest China[J]. Ecological Engineering, 2007, 29: 117–124.

[5] Cao C. Ecological process of vegetation restoration in *Caragana microphylla* sand-fixing area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(3): 349–354.

[6] Zhao H L, Zhou R L, Su Y Z, et al. Shrub facilitation of desert land restoration in the Horqin Sand Land of Inner Mongolia[J]. Ecological Engineering, 2007, 31(1): 1–8.

[7] 丁越岿, 杨劼, 宋炳煜, 等. 不同植被类型对毛乌素沙地土壤有机碳的影响[J]. 草业学报, 2012, 21(2): 18-25. [Ding Yuekui, Yang Jie, Song Bingyu, et al. Effects of different vegetation types on soil organic carbon of Mu Us Sand Land[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(2): 18-25.]

[8] 杨晓娟, 廖超英, 刘莉丽, 等. 毛乌素沙地不同植被对土壤有机质和生物学特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(3): 77-83. [Yang Xiaojuan, Liao Chaoying, Liu Lili, et al. Effect of different vegetations on soil organic matter and biological properties in Mu Us Sand Land[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2012, 40(3): 77-83.]

[9] 许冬梅, 王堃. 毛乌素沙地南缘生态过渡带土壤微生物特征[J]. 中国沙漠, 2007, 27(5): 805-808. [Xu Dongmei, Wang Kun. Characteristics of soil microbe in southern ecotone of Mu Us Sand Land[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(5): 805-808.]

[10] 许冬梅, 王堃, 谢应忠, 等. 毛乌素沙地南缘生态过渡带土壤生物学特性[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(34): 15078-15080. [Xu Dongmei, Wang Kun, Xie Yingzhong, et al. Characteristics of soil biology in southern ecotone of Mu Us Sandy Land[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(34): 15078-15080.]

[11] 许冬梅, 王堃, 龙澍普. 毛乌素沙地南缘生态过渡带植被和土壤的特性[J]. 水土保持通报, 2008, 28(5): 39-43, 47. [Xu Dongmei, Wang Kun, Long Shupu. Vegetation characteristics and soil properties in the transitional zone in south fringe of Mu Us Sandy Land[J]. Bulletin of Soil & Water Conservation, 2008, 28(5): 39-43, 47.]

[12] Schlesinger W H, Raikes J A, Cross H A F. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems[J]. Ecology, 1996, 77(2): 364-374.

[13] Farley R A, Fitter A H. Temporal and spatial variation in soil resources in a deciduous woodland[J]. Journal of Ecology, 1999, 87(4): 688-696.

[14] Wang J, Fu B J, Qiu Y. Spatial heterogeneity of soil nutrients in a small catchment of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(8): 1173-1178.

[15] 闫峰, 吴波, 王艳姣. 2000—2011年毛乌素沙地植被生长状况时空变化特征[J]. 地理科学, 2013, 33(5): 602-608. [Yan Feng, Wu Bo, Wang Yanjiao. Temporal and spatial changes of vegetation growth in Mu Us Sandy Land from 2000 to 2011[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(5): 602-608.]

[16] 王彦武, 廖超英, 孙长忠, 等. 毛乌素沙地固沙林土壤化学性质差异[J]. 土壤通报, 2009, 40(4): 776-780. [Wang Yanwu, Liao Chaoying, Sun Changzhong, et al. Differences in soil chemical properties of sand-fixing forest in Mu Us sandy land[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(4): 776-780.]

[17] Klute A, Dirksen C. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory Methods[J]. Methods of Soil Analysis, 1986.

[18] Nelson D W, Sommers L E, Sparks D L, et al. Total carbon, organic carbon, and organic matter[J]. Methods of Soil Analysis, 1982, 9: 961-1010.

[19] Bremner J M, Mulvaney C S. Nitrogen-total[J]. Methods of Soil Analysis Chemical Methods Part, 1996, 72: 532-535.

[20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000. [Bao Shidan. Soil Agro-Chemistrical Analysis [M]. 3nd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.]

[21] Wu Z X, Xie G S, Tao Z L, et al. Characteristics of soil organic carbon and total nitrogen in rubber plantations soil at different age stages in the western region of Hainan island[J]. Agricultural Science & Technology, 2010, 11(1): 147-153.

[22] 王洪杰, 李宪文, 史学正, 等. 不同土地利用方式下土壤养分的分布及其与土壤颗粒组成的关系[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 44-46, 50. [Wang Hongjie, Li Xianwen, Shi Xuezheng, et al. Distribution of soil nutrient under different land use and relationship between soil nutrient and soil granule composition[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2003, 17(2): 44-46, 50.]

[23] 程立平, 赵玉明, 刘沛松. 豫西低山丘陵区不同植被修复模式下土壤养分评价[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(10): 423-426. [Cheng Liping, Zhao Yuming, Liu Peisong. Soil nutrient evaluation under different vegetation restoration models in low hilly areas of western Henan[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2015, 43(10): 423-426.]

[24] Li Y, Awada T, Zhou X, et al. Mongolian pine plantations enhance soil physico-chemical properties and carbon and nitrogen capacities in semi-arid degraded sandy land in China[J]. Applied Soil Ecology, 2012, 56: 1-9.

[25] Zhang B, Yang Y S, Zepp H. Effect of vegetation restoration on soil and water erosion and nutrient losses of a severely eroded clayey Plinthudult in southeastern China[J]. Catena, 2004, 57(1): 77-90.

[26] Zhang S R, Sun B, Zhao Q G, et al. Temporal-spatial variability of soil organic carbon stocks in a rehabilitating ecosystem[J]. Pedosphere, 2004, 14(4): 501-508.

[27] Sleutel S, Neve S D, Hofman G. Estimates of carbon stock changes in Belgian cropland[J]. Soil Use and Management, 2003, 19(2): 166-171.

[28] Lettens S, Orshoven J V, Wesemael B V, et al. Soil organic and inorganic carbon contents of landscape units in Belgium derived using data from 1950 to 1970[J]. Soil Use and Management, 2004, 20(1): 40-47.

[29] 谭学进, 穆兴民, 高鹏, 等. 黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响[J]. 中国环境科学, 2019, 39(2): 713-722. [Tan Xuejin, Mu Xingmin, Gao Peng, et al. Effects of vegetation restoration on changes to soil physical properties on the Loess Plateau[J]. China Environmental Science, 2019, 39(2): 713-722.]

[30] 于冬雪, 贾小旭, 黄来明, 等. 黄土区不同土层土壤容重空间变异与模拟[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 55-64. [Yu Dongxue, Jia Xiaoxu, Huang Laiming, et al. Spatial variation of soil bulk density in different soil layers in the Loess area and simulation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(1): 55-64.]

[31] Han F P, Hu W, Zheng J, et al. Estimating soil organic carbon storage and distribution in a catchment of Loess Plateau, China[J]. Geoderma, 2010, 154(3-4): 261-266.

[32] 陈建宇. 杉木林下植被生物量与土壤容重关系的研究[J]. 福建林业科技, 2000, 27(4): 56-60. [Chen Jianyu. Study on the relation between under vegetation biomass and soil bulk density of *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2000, 27(4): 56-60.]

[33] Xu N. Comparative studies on soil bulk density and underground roots biomass under different land use types in northwestern Yunnan province[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36 (5): 1961-1963.

[34] 关其格, 浩必斯嘎拉图, 杨越, 等. 毛乌素沙地南缘人工恢复植被对沙地土壤理化性质的影响[J]. 安徽农业科学, 2013, 41 (34): 13217-13220. [Guan Qige, Hao Bisigalatu, Yang Yue, et al. Effects of artificial vegetation restoration on soil physicochemical properties in southern edge of Mu Us Sandy Land[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(34): 13217-13220.]

[35] 王彦武, 廖超英, 徐恒. 毛乌素沙地固沙林土壤物理性状研究[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(3): 36-39. [Wang Yanwu, Liao Chaoying, Xu Heng. Soil physical properties of sand-fixing forests in Maowusu Sandland[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(3): 36-39.]

[36] Chang R, Fu B, Liu G, et al. The effects of afforestation on soil organic and inorganic carbon: A case study of the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2012, 95: 145-152.

[37] 王国梁, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应[J]. 水土保持通报, 2002, 22(1): 1-5. [Wang Guoliang, Liu Guobin, Xu Mingxiang. Effect of vegetation restoration on soil nutrient changes in Zhifanggou watershed of Loess Hilly Region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002, 22(1): 1-5.]

[38] Han F P, Dong L N, Luo W L, et al. Effects of *Stipa bungeana* on soil water contents and nutrients of sloping lands in Loess Plateau of China[J]. Acta Agrestia Sinica, 2008, 16(4): 403-407.

[39] Gao Y, Peng Dang. Effects of vegetation rehabilitation on soil organic and inorganic carbon stocks in the Mu Us Desert, Northwest China[J]. Land Degradation and Development, 2017, 29(4): 1031-1040.

[40] 王树起, 韩晓增, 乔云发, 等. 不同土地利用和施肥方式对土壤酶活性及相关肥力因子的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(6): 1311-1316. [Wang Shuqi, Han Xiaozeng, Qiao Yunfa, et al. Effects of land uses and fertilization systems on soil enzyme activities and nutrients[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(6): 1311-1316.]

[41] 牛昱涵, 施曼, 王心怡, 等. 苏南地区农业土地利用方式改变对土壤理化及生物学性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(10): 1657-1668. [Niu Yuhan, Shi Man, Wang Xinyi, et al. Influence of agricultural land use changes on soil physiochemical and biological characteristics in Southern Jiangsu province[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(10): 1657-1668.]

[42] 杨越, 哈斯, 孙保平, 等. 毛乌素沙地南缘不同植被恢复类型的土壤养分效应[J]. 中国农学通报, 2012, 28(10): 37-42. [Yang Yue, Ha Si, Sun Baoping, et al. Effects of different vegetation restoration types on soil nutrients in southern edge of Mu Us Sandy Land[J]. Agricultural Science & Technology, 2012, 28(10): 37-42.]

[43] 程杰, 高亚军. 云雾山封育草地土壤养分变化特征[J]. 草地学报, 2007, 15(3): 273-277. [Cheng Jie, Gao Yajun. Variability of soil nutrient in enclosed grassland of Yunwu Mountain[J]. Acta Agrestia Sinica, 2007, 15(3): 273-277.]

[44] Jia X X, Wei X R, Shao M A, et al. Distribution of soil carbon and nitrogen along a revegetational succession on the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2012, 95: 160-168.

[45] Dlamini P, Chivenge P, Manson A, et al. Land degradation impact on soil organic carbon and nitrogen stocks of sub-tropical humid grasslands in South Africa[J]. Geoderma, 2014, 235-236: 372-381.

[46] Harris R B. Rangeland degradation on the Qinghai-Tibetan plateau: A review of the evidence of its magnitude and causes[J]. Journal of Arid Environments, 2010, 74(1): 1-12.

[47] 金红宇, 徐文娣, 陈国雄. 花棒生理生态研究及其展望[J]. 西北农业学报, 2018, 27(11): 1563-1577. [Jin Hongyu, Xu Wendi, Chen Guoxiong. Researh of Huabang(*Hedysarum scoparium*) ecophysiology and its perspectives[J]. Acta Agricuture Borial-Occidentalis Sinica, 2018, 27(11): 1563-1577.]

[48] Lal R. Deforestation and land-use effects on soil degradation and rehabilitation in western Nigeria. II. Soil chemical properties[J]. Land Degradation Development, 1996, 7(2): 87-98.

[49] Grandy A S, Robertson G P. Land-use intensity effects on soil organic carbon accumulation rates and mechanisms[J]. Ecosystems, 2007, 10(1): 59-74.

[50] Cunningham S C, Metzeling K J, Nally R M, et al. Changes in soil carbon of pastures after afforestation with mixed species: sampling, heterogeneity and surrogates[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2012, 158: 58-65.

[51] Li Y Q, Brandle J, Awada T, et al. Accumulation of carbon and nitrogen in the plant-soil system after afforestation of active sand dunes in China's Horqin Sandy Land[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2013, 177: 75-84.

[52] 张庆费, 宋永昌, 由文辉. 浙江天童植物群落次生演替与土壤肥力的关系[J]. 生态学报, 1999, 19(2): 32-36. [Zhang Qingfei, Song Yongchang, You Wenhui. Relationship between plant community secondary succession and soil fertility in Tiantong, Zhejiang province[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(2): 32-36.]

Effects of artificial sand-fixing vegetation on soil nutrients in Mu Us Sandy Land

CHEN Wen[1], YANG Jing-jing[1], YUAN Yuan[1], ZHANG He[1], HAN Feng-peng[1,2]

(1. *College of Resources and Environment*, *Northwest A&F University*, *Yangling* 712100, *Shaanxi*, *China*;
2. *Research Center on Soil&Water Conservation*, *Ministry of Water Resources*, *Institute of Soil and Water Conservation*, *Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources*, *Yangling* 712100, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: In order to explore the influence of different artificial sand-fixing vegetation on soil nutrients in Mu Us Sandy Land, six typical vegetation types were selected as research subjects. The physical and chemical properties of 0- 100 cm soil were analyzed, and the soil nutrient index (SNI) of different vegetation restoration models was calculated by principal component analysis method. The results showed that there was no significant difference in soil bulk density among the six artificial sand-fixing vegetation types, showing weak variation. The soil organic carbon (SOC) and total nitrogen content in the surface layer was larger than in the bottom layer. There was no difference in total potassium and phosphorus content. The SOC density of 0-20 cm soil layer is significantly higher than that of other soil layers, showing obvious surface aggregation phenomenon. Except for the control of bare sand, the SOC cumulative reserves of 0-100 cm soil layer can be simulated by linear function [$y = a\ln(x) + b$, $R^2 > 0.96$] as soil depth changes. The SNI from large to small was observed as follows: *Hedysarum scoparium* > *Pinus sylvestris* > *Medicago sativa* > *Amorpha fruticose* > *Amygdalus pcdunculata* > *Artemisia desertorum*. The results showed that the soil nutrient status of *H. scoparium* forest was the best, and *H. scoparium* was the most suitable vegetation to be planted in Mu Us Sandy Land.

Keywords: Mu Us Sandy Land; artificial sand fixation; soil bulk density; soil nutrients; nutrient index